

레이저 용접판재의 성형성에 관한 연구

강수영, 류석중, 김종하, 이호기, 이경남
대우자동차 기술연구소

STUDY ON THE FORMABILITY OF LASER WELDED BLANKS

SOO-YOUNG KANG, SUK-JONG YOO, JONG HA KIM, HO-KI YI, KYUNG-NAM LEE
DAEWOO MOTOR CO., TECHNICAL CENTER

ABSTRACT

In this study, the formability of laser welded blanks were investigated through tesile test and formability test. Several samples which had the various thickness were joined by laser welding. Mechanical properties of laser welded blank measured from the tensile test are higher than those of the base metal. Fomability is lower than that of the base metal.

1. 서 론

용접판재를 자동차에 적용하는 경우, 일반적으로 용접부의 특성은 1) 용접비드부의 열변형이 적을것, 2) WELD SEAM과 모재의 성질이 유사할 것, 3) WELD SEAM폭이 작을 것, 4) 생산성이 우수할 것등의 조건을 만족하여야 한다. 이러한 조건에 부합하는 용접법의 하나로 레이저를 이용하는 것이 있다.

레이저 용접은 용융 접합 범주에 속하며 고밀도 레이저 빔이 집속되어 피용접물에 흡수되고 열로 변환되어 국부적인 용융이 일어난다. 레이저 빔은 전자파로서 레이저 광원과 물체 사이에 기계적 또는 전기적 접촉이 없으며, 수 kW급의 CO₂레이저가 출현하면서 레이저 용접의 중요성이 부각되기 시작했다. 레이저 용접은 용접속도가 빠르며, 용입깊이가 깊고, 열에 의한 변형이 작으며, 어느 분위기에서도 용접이 가능하다는 장점이외에도, 같은 장비로 절단 및 표면처리 등을 동시에 할 수 있다는 특성으로 인해 점차 그 사용범위가 확대되고 있다. 특히 레이저 용접의 생산공정 적용에 관한 연구도 국내외적으로 활발히 진행되고 있다. 그 예로써, 이미 일본과 미국 등 선진국에서는 자동차 산업에 레이저 용접을 많이 응용하고 있으며 국내 자동차 업계에서도 레이저의 도입 및 그 응용 기술 적용이 활발하게 검토되고 있다.

Badylamy⁽¹⁾와 Szinyur⁽¹⁾은 용접 결과에 가장 큰 영향을 미치는 용접 인자에 관한 연구를, Bhatt⁽²⁾은 Mash Seam용접과 레이저 용접으로 제작된 용접판재에서 용접변수들 각각의 적정 범위와 이들의 최적의 조합을 도출하였다. 이외에도 레이저 판재의 제조측면과 생산성 측면등에 대한 많은 연구들이⁽³⁾⁻⁽⁵⁾ 진행되고 있다.

본 연구에서는 레이저 용접 판재의 적용을 위한 검토단계로써 각기 다른 3종류(표 1)의 레이저 용접판재를 제작한 후 기계적 물성 시험과 성형성 비교평가를 통해 레이저 용접 판재 적용을 위한 기초자료를 확보하고자한다.

표 1. 레이저 용접판재의 시편종류

	시편종류
동종재	0.9T : 0.9T
이종재	0.7T : 1.5T
	0.9T : 2.0T

2. 실험 방법

2.1 시편의 준비

본연구에 사용된 강판의 화학성분을 표 2에 나타내었다. 강판의 용접은 CO₂레이저를 이용하였으며, 용접조건은 표 3과 같다. 미세조직의 상태 및 용접부 크기를 평가하기 위해 용접된 시편을 나이탈용액으로 에칭한 후에 조직을 관찰하였다.

표 2. 강판의 화학성분

두께(mm)	성분(WT%)				
	C	Si	Mn	P	S
0.7	0.054	0.018	0.28	0.009	0.016
0.9	0.033	0.018	0.23	0.012	0.011
1.5	0.066	0.021	0.46	0.015	0.014
2.0	0.029	0.019	0.20	0.007	0.015

표 3. 레이저 용접시 용접조건

용접속도	7m/min	Tilting 각도	7°
용접출력	6Kw	보조가스	He

2.2 인장시험

인장시험은 INSTRON사의 10TON UTM을 이용하였고 시편의 모양과 크기는 그림 1에 나타내었다. 인장시편은 해당 두께별로 3가지 종류(0°, 45°, 90°)를 준비하였고, 종류별 의미는 표 4와 같다. 각 결과치는 5번의 시험을 통하여 나온 결과를 평균한 값이다.

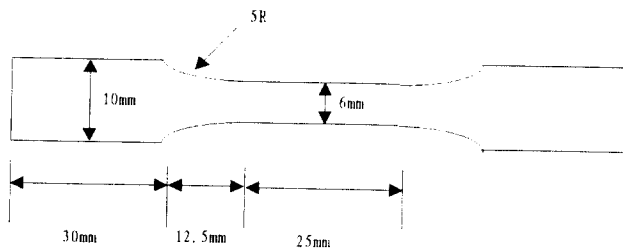


그림 1. SUB SIZE 인장시편(FULL SIZE는 SUB SIZE의 두배)

표 4. 0°, 45°, 90° 의 의미

0°	용접방향과 인장시편의 인장방향이 평행
45°	용접방향과 인장시편의 인장방향이 45°
90°	용접방향과 인장시편의 인장방향이 수직

2.3 성형시험

성형시험은 일본 THOSI사 관재성형장비를 이용하여 DOME HEIGHT 측정, DRAWING, ERICHSEN 시험을 행하였다. DOME HEIGHT 측정 시험시 펀치 직경은 100mm이고, DRAWING 시험에서는 50mm이다. BLANK HOLDING FORCE(B.H.F.)는 DOME HEIGHT 측정 시험시 40TONF로 하였고, DRAWING 시험에서는 1TONF, ERICHSEN 시험시 20TONF로 하였다. 시편의 크기는 표 5에 정리하였다. DOME HEIGHT 측정 시험시, 예비시험을 통해 인장, 평면과 이축인장 변형조건에 해당되는 시편폭을 20, 120과 170mm로 결정하였다.

표 5. 성형시험법과 각 시험편의 크기

시험법	시편크기(mm×mm)
DOME HEIGHT 측정 시험	20×170, 120×170, 170×170
DRAWING 시험	130×130
ERICHSEN 시험	90×90

3. 실험결과 및 고찰

3.1 조직시험 결과

WELD SEAM의 경도값은 Hv 280~350사이의 값을 가졌고, 조직사진과 경도값으로부터 용접부는 주로 마르텐사이트로 이루어진 조직임을 알 수 있다. 사진 1에 WELD SEAM의 대표적인 조직 사진을 나타내었다. WELD SEAM의 크기는 조직 사진상의 마르텐사이트라고 판단되는 부분까지를 측정하여 결정하였으며 측정결과를 표 6에 나타내었다.



사진 1. 레이저 용접판재의 대표적 조직사진

표 6. 조직사진으로부터 평가한 WELD SEAM의 크기

시편종류	WELD SEAM 크기(평균크기)
0.9T : 0.9T	0.38mm
0.7T : 1.5T	0.77mm
0.9T : 2.0T	0.44mm

3.2 인장시험 결과

응력과 변형을 사이의 관계식은 여러가지가 있으나, 여기서는 물리적 의미를 부여하기에 가장 좋은 식인 홀로몬 식($\sigma = k \epsilon^n$)을 이용하였고, WELD SEAM의 물성은 식 (1)을 이용하여 실험치인 $K(T) \epsilon^{n(T)} = 604.2 \epsilon^{0.2}$, $K(B) \epsilon^{n(B)} = 550.8 \epsilon^{0.235}$ 과 WELD SEAM의 부피분율(F(W))을 이용하여 평가하였다. 여기에서 F(W)는 WELD SEAM과 열영향부의 합으로 하였다. 식 (1)을 이용하여 WELD SEAM의 물성을 평가하면 $\sigma = 981 \epsilon^{0.052}$ 이고, 항복강도는 평가식에서 신율을 0.002를 대입한 결과 710MPa의 값을 얻을 수 있었고, 인장강도는 평가식에서 신율을 균일 연신율 값인 0.052를 대입한 결과 842MPa의 값을 얻을 수 있었으며 균일 연신율은 5.2%이다. 위의 값은 동종 레이저 용접 판재(0.9T:0.9T, 0°)의 값을 이용하여 평가한 값이다. 이종 두께 및 동종 두께의 WELD SEAM의 경도값은 비슷하고, WELD SEAM부의 인장거동은 $\sigma = 981 \epsilon^{0.052}$ 와 유사하다.

$$K(T) \epsilon^{n(T)} = F(B)K(B) \epsilon^{n(B)} + F(W)K(W) \epsilon^{n(W)} \quad (1)$$

- K(T) : 모재와 WELD SEAM의 강도계수
- n(T) : 모재와 WELD SEAM의 가공경화지수
- F(B) : 모재의 부피분율(0~1, 1-F(W))
- K(B) : 모재의 강도계수
- n(B) : 모재의 가공경화지수
- F(W) : WELD SEAM의 부피분율(0~1)
- K(W) : WELD SEAM의 강도계수
- n(W) : WELD SEAM의 가공경화지수

그림 2, 3, 4, 5, 6에 0.9T : 0.9T 레이저 용접 판재의 인장시험 결과를 토대로, WELD SEAM 분율에 따른 항복강도, 인장강도, 연신율, 강도계수 및 가공경화지수 등을 도시하였다. WELD SEAM의 분율이 증가할수록 항복강도와 인장강도는 증가하고, 신율의 경우는 연성이 작은 WELD SEAM의 영향으로 감소한다. 강도계수는 강도가 강한(강도계수가 큰) WELD SEAM의 영향으로 WELD SEAM의 분율이 증가할수록 증가한다. 가공경화지수는 WELD SEAM의 분율이 증가할수록 감소한다. 이러한 경향은 시편의 폭이 작아질수록 강하고 신율이 작은 WELD SEAM의 영향을 더 많이 받음을 알 수 있다. 설계나 금형 TRY-OUT시 이러한 점을 고려하여 이 모드에서는 가능하면 WELD SEAM의 영향을 적게받게 하여야할 것이다.

45°, 90° 시편의 경우는 표 7에 인장시험 결과를 나타내었다. 시편의 형상(이종 레이저 용접 판재, 동종 레이저 용접 판재)에 따라 항복강도와 인장강도의 값은 크게 변화 하지 않았다. 그러나 가공경화지수, 강도계수와 연신율은 차이를 보이는데 이는 인장 시 변형이 강성이 적은 시편에서 집중이 된다는 사실을 감안하면 실험값을 이해할 수 있다. 동종 및 이종판재 0° 시편의 경우는 파단이 용접부로부터 시작되고, 45° 와 90° 의 경우는 강도가 약한 모재에서 파단이 시작된다. 사진 2는 0°, 90° 인장 시험후의 파괴 양상을 나타낸다.

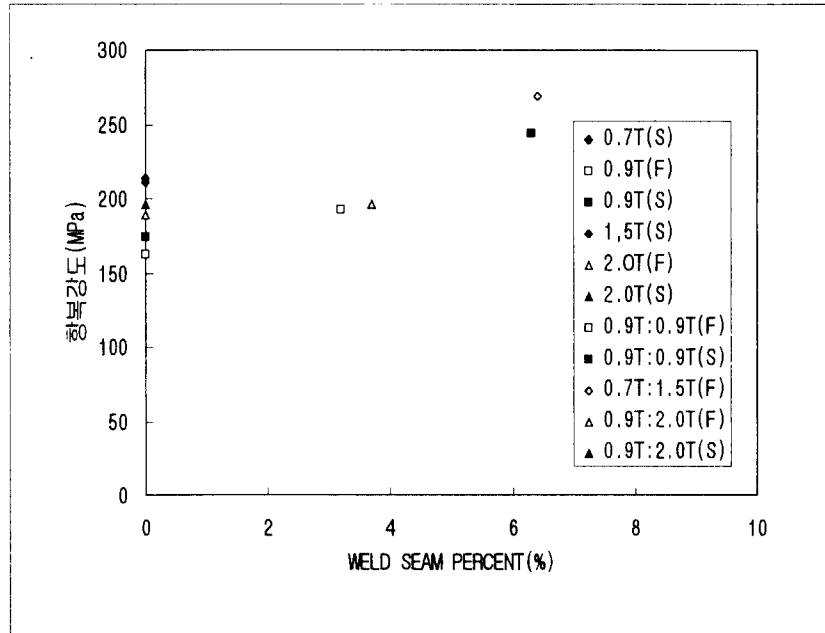


그림 2. 각 용접판재의 WELD SEAM분율에 따른 항복강도의 변화

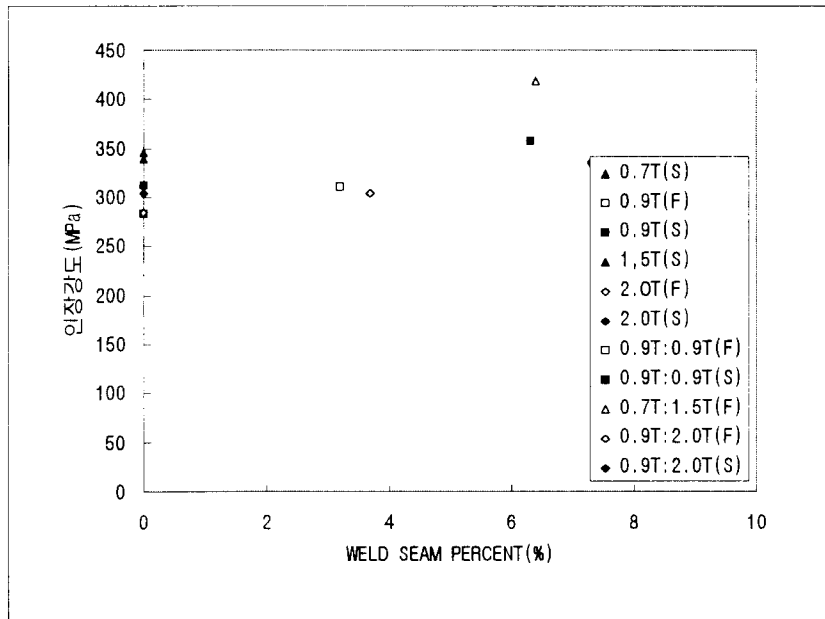


그림 3. 각 용접판재의 WELD SEAM분율에 따른 인장강도의 변화

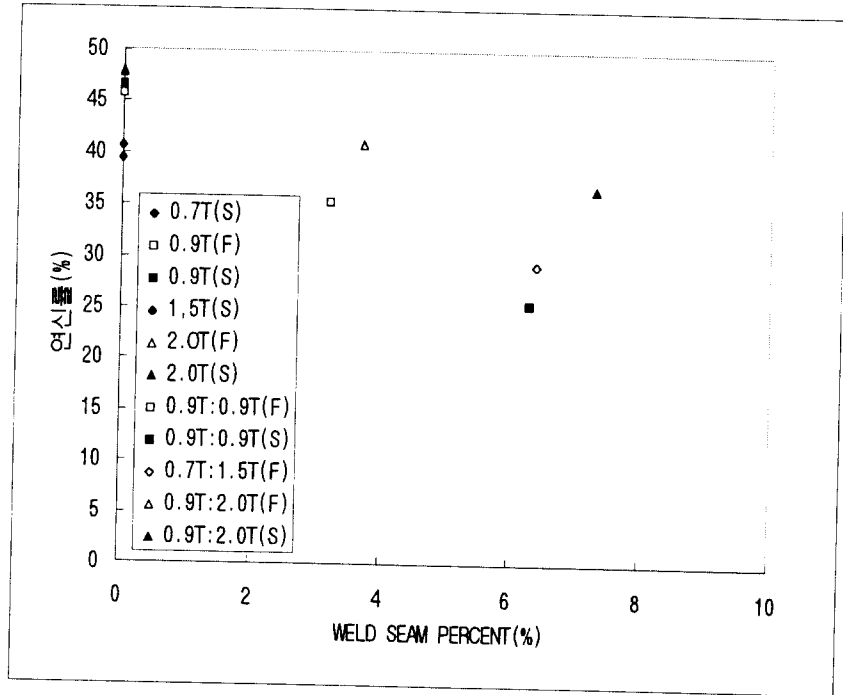


그림 4. 각 용접판재의 WELD SEAM분율에 따른 연신율의 변화

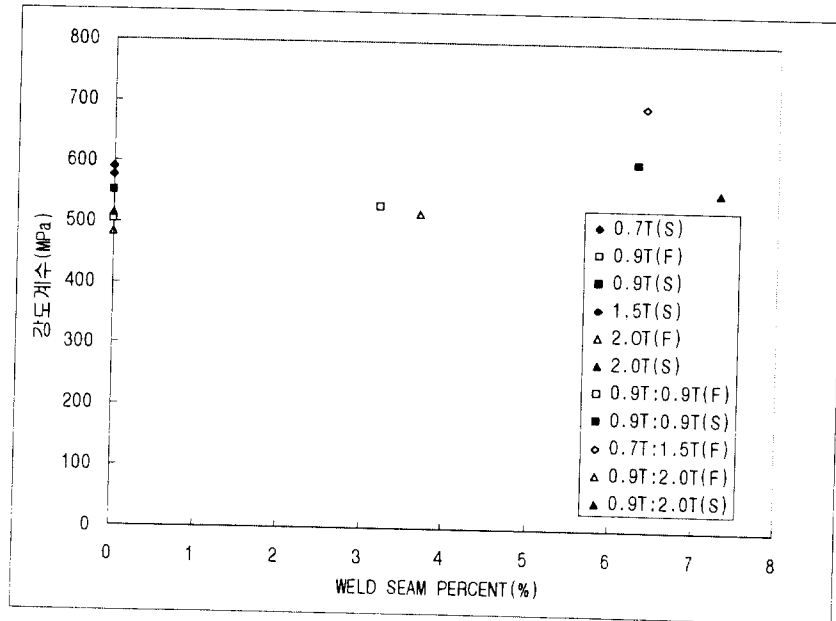


그림 5. 각 용접판재의 WELD SEAM분율에 따른 강도계수의 변화

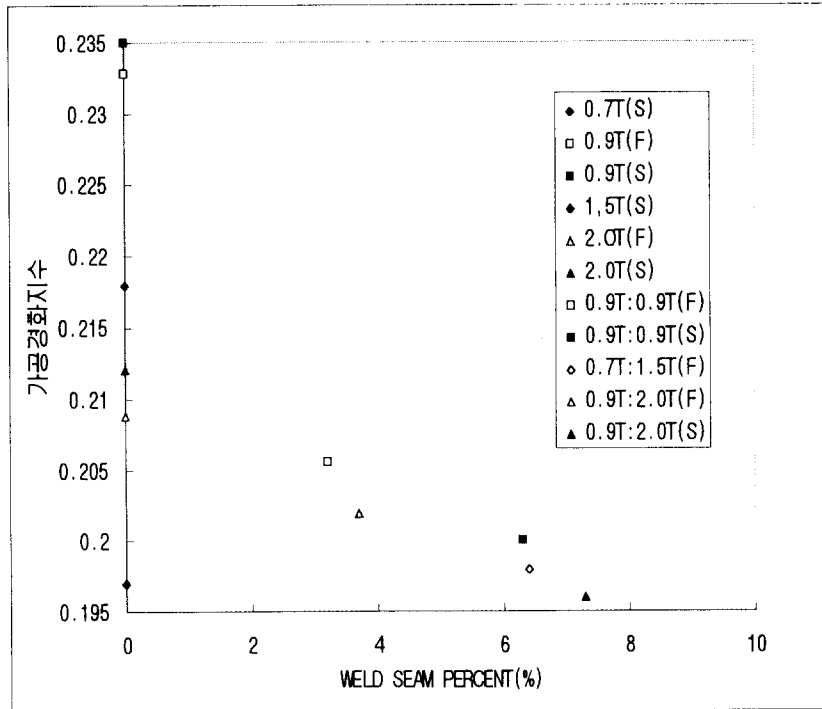


그림 6. 각 용접판재의 WELD SEAM분율에 따른 가공경화지수의 변화

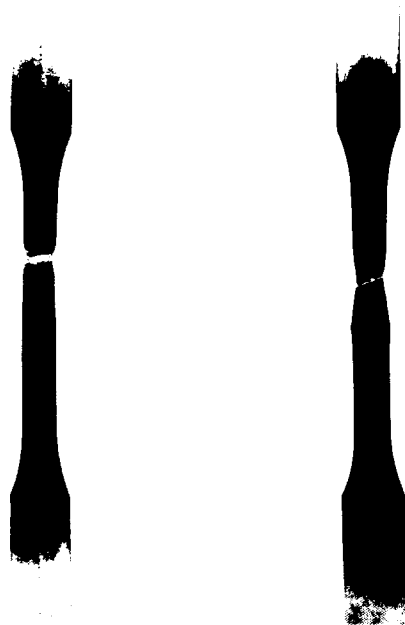


사진 2. 0°, 90°시편의 인장시험후의 양상

표 7. 인장시험 결과

용접조건	두께 (mm)	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	가공경화지수	강도계수	연신율	시편종류
45°	0.7	211.2	345.5	0.219	598.2	31.8	SUB SIZE
	0.9	176.6	312.2	0.225	547.5	33.8	SUB SIZE
	1.5	215.9	353.8	0.201	600.5	30.7	SUB SIZE
	2.0	203.4	302.2	0.2	513.3	36.6	SUB SIZE
	0.9:0.9	186.6	319.6	0.2017	539.7	30	SUB SIZE
	0.7:1.5	222.4	350.3	-	-	21.3	SUB SIZE
	0.9:2.0	171.9	298.2	-	-	25.5	SUB SIZE
90°	0.7	205.2	342.1	0.228	602.5	38.6	SUB SIZE
	0.9	178.1	308.9	0.233	547.5	43.5	SUB SIZE
	1.5	208.5	347.1	0.195	576.	39.7	SUB SIZE
	2.0	201.5	301.3	0.202	502.1	45.3	SUB SIZE
	0.9:0.9	180.3	311.9	0.213	537.6	30.6	SUB SIZE
	0.7:1.5	213	346.2	-	-	19.7	SUB SIZE
	0.9:2.0	182.9	304.6	-	-	23.0	SUB SIZE

3.3 성형시험 결과

동종 레이저 용접판재의 폭에 따른 DOME HEIGHT를 측정하여 용접시편과 모재와의 성형성을 비교하였다(그림 7). 폭이 20mm인 경우, 레이저 용접판재는 모재에 비해 DOME HEIGHT가 감소하였다(사진 3). 폭이 120mm인 경우, 이 조건은 평면변형에 해당하고 레이저 용접판재는 모재에 비해 DOME HEIGHT가 상당히 감소하였다. 폭이 170mm인 경우, 이 조건 역시 레이저 용접판재는 모재에 비해 DOME HEIGHT가 감소하였고, 윤활이 증가하면 당연한 결과로 DOME HEIGHT가 증가하여 이축인장 조건에 더 근접하게 됨을 알 수 있다(사진 4). 이 결과들로부터 동종 레이저 용접판재의 DOME HEIGHT는 용접부를 포함하지 않은 모재의 DOME HEIGHT에 비해 감소함을 알 수 있다.

그림 8에 용접 판재의 모재부와 용접부의 성형한계도를 나타내었다. 모재부의 FLC₀값은 50%이고, 용접부의 FLC₀값은 32%이다. 용접부에 기인하여 레이저 용접 판재의 성형성은 상당히 많이 감소하였으나, 이값은 차체 적용 알루미늄 (5000계열 및 6000계열 알루미늄의 경우, FLC₀= 20~25%) 보다는 성형성이 좋다. 성형한계도의 왼쪽영역

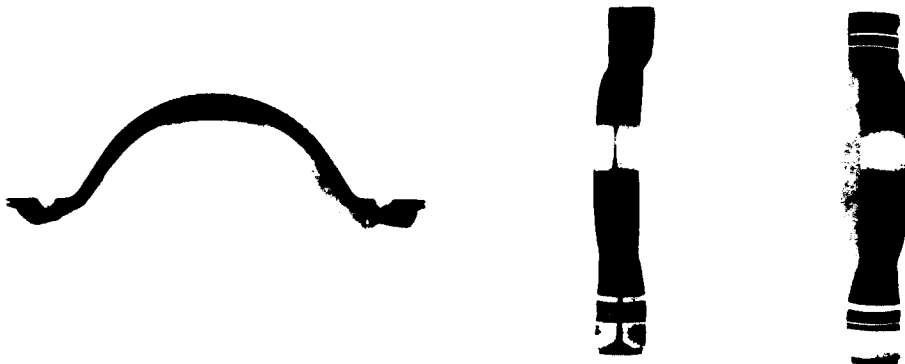


사진 3. 폭이 20mm인 동종 레이저 용접판재 STRETCHING후의 형상

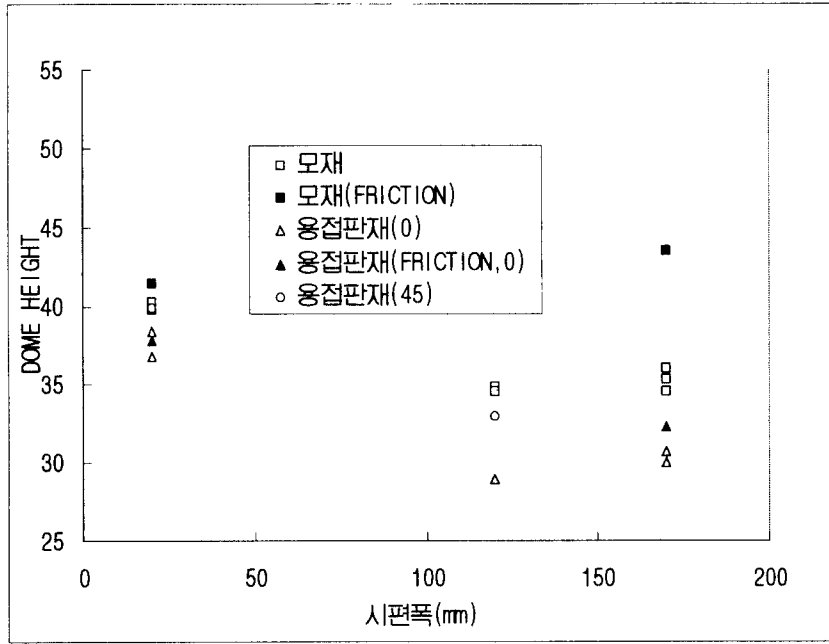


그림 7. 용접판재의 시편폭에 따른 DOME HEIGHT(0.9T : 0.9T)

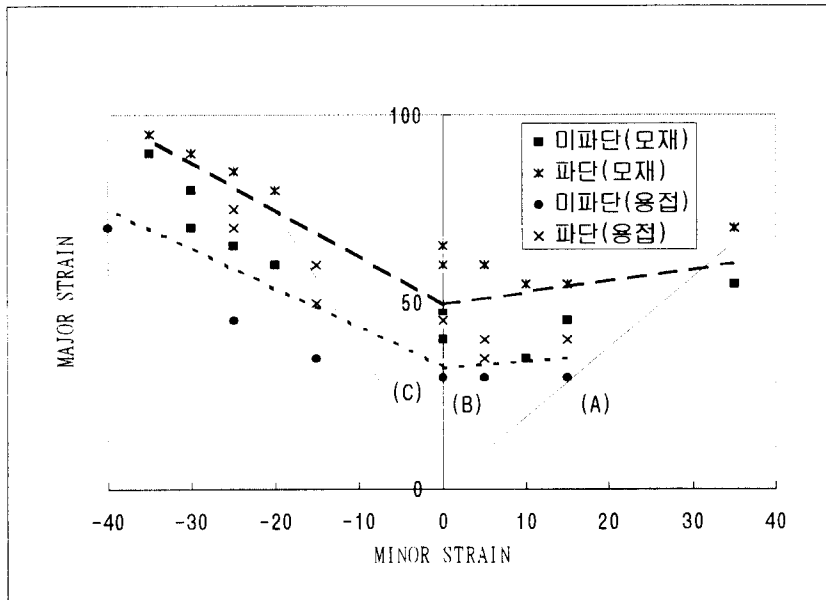


그림 8. 용접판재 WELD SEAM부위와 모재부의 FLD(0.9T : 0.9T)

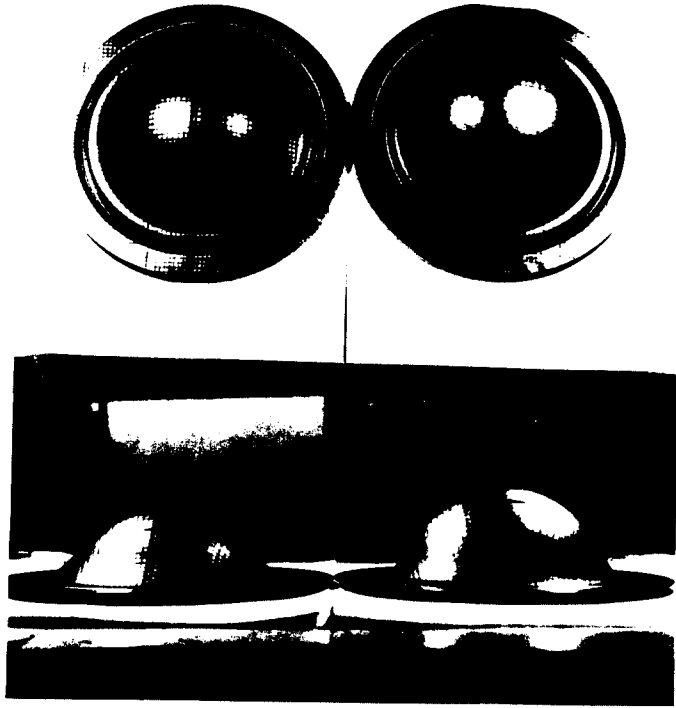


사진 4. 폭이 170mm인 동종 레이저 용접판재 STRETCHING후의 형상

(인장영역)의 경우 모재와 용접판재가 유사한 CURVE를 가지나, 오른쪽 영역(이축인장)의 경우 용접판재의 CURVE는 모재의 CURVE에 비해 상대적으로 기울기가 작다. 이 현상으로부터, 이축 인장, 평면 인장, 일축 인장의 순으로 용접부 영향이 작아진다는 사실을 알 수 있다(그림 9에 (A)곡선, (B)곡선, (C)곡선참조). 이는 WELD SEAM의 변형거동에 모재의 도움정도가 이축 인장, 평면 인장, 일축 인장순으로 증가하는 것에 기인한다.

표 8에 ERICHSEN값과 LDR값을 용접시편과 모재를 비교하여 나타내었다. ERICHSEN 값은 STRETCHING시험과 유사하게 모재에 비해 8.9% 감소하였다(사진 5). LDR값은 변화가 없었으나 시편의 형상은 모재만의 LDR시험의 결과와 차이가 있다(사진 6). 판재는 일반적으로 소성변형비가 압연방향에 45° 부분이 작아 DEEP DRAWING시험을 하면 4개의 귀(0° , 90° , 180° , 270°)가 나타난다. 레이저 용접부의 경우, 용접부를 포함한 귀의 정상부근이 둘로 갈라진다. 이는 WELD SEAM의 변형에 대한 저항에 기인한 결과이다. 그리고 이종판재의 경우 얇은 시편에서 변형이 집중되었고, 용접선 SHIFT 현상이 관찰되었다(사진 7). 레이저 용접판재의 경우 대부분의 조합이 이종판재이고, 얇은 판재쪽에 변형 집중과 용접선 SHIFT 현상의 이해가 이종판재의 성형에서 가장 중요한 부분이다. 이에 대한 논의는 추후에 언급하고자 한다.

표 8. 모재와 레이저 용접판재의 ERICHSEN값과 LDR

	모재	용접
ERICHSEN 값	10.3mm	9.38mm (8.9% ↓)
LDR	2.2	2.2

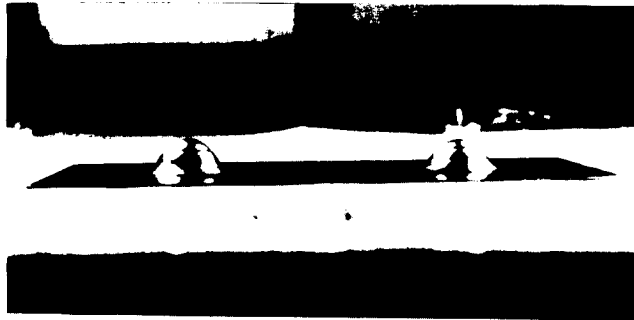
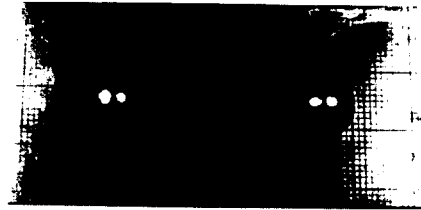


사진 5. ERICHSEN 시험후의 시편형상



사진 6. DEEP DRAWING 시험후의 시편형상



사진 7. 폭이 170mm인 이중 레이저 용접판재 STRETCHING후의 형상

4. 결론

레이저 용접판재의 적용을 위한 기초자료 확보를 위해 부품의 제조성 측면에서 인장특성과 성형 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 인장시험후 WELD SEAM부의 물성은 $\sigma = 981 \epsilon^{0.052}$, 항복강도 = 710MPa, 인장강도 = 842MPa이고 균일 연신율은 5.2%로 평가된다. 이러한 WELD SEAM의 영향으로 WELD SEAM를 포함한 레이저 용접판재의 강도는 증가하였고 연성은 감소하였다.
2. 용접 판재의 모재부와 용접부위의 성형한계도를 완성한 결과 모재의 $FLC_0 = 50\%$ 이고 용접판재의 $FLC_0 = 32\%$ 이었으며 모재에 비해 동종 레이저 용접판재는 이축인장, 평면 인장, 일축인장의 순으로 용접부 영향이 작아진다.
3. 동종 레이저 용접판재의 경우 성형성은 감소하나 이러한 측면을 고려하여 설계를 하면 제조시 큰 문제를 야기하지 않을 것으로 평가된다.

참고문헌

1. M. Eisenmenger, K.K. Bhatt and M. F. Shi, Influence of laser welding parameters on Formability and Robustness of Blank Manufacturing, An Application to a Body Side frame, 1995 SAE Congress
2. K.M. Radlmayr, J. Szinyur, Laser Welded Sheet Panels for the Body In White, IDDRG Working Groups Meeting, PISA, Italy Palazzo dei congressi, 1991
3. K. Natsumi, et al., "Laser welding technology for joining different sheet metals in one-piece stamping process", Int. J. of Materials and Production Technology, 7 2 189, 1992

4. A. J. Selige and W. Prange, "Production and usage of laser beam-welded sheet metal", SAE 870413, 1987
5. W. Prange, et al., "Application of laser beam welded sheet metal", SAE 890853, 1989